



TITLE:

研究室紹介

AUTHOR(S):

CITATION:

研究室紹介. Cue 2011, 25: 14-33

ISSUE DATE:

2011-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/145920>

RIGHT:

新設研究室紹介

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野 (中村祐研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

「トーラス型プラズマの磁場閉じ込めにおける非軸対称性の影響」

太陽のエネルギー源である核融合エネルギーを地上で利用する人工太陽炉を実現するには、燃料を制御熱核融合反応に必要な一億度以上に加熱する必要があります。このような状況では物質はプラズマ状態になっています。したがって、人工太陽炉実現には、このような超高温プラズマを閉じ込める必要があります。プラズマは荷電粒子の集合体なので、これを閉じ込める手段として磁場を用いた方法が検討されています。そのための方法として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラスプラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位（MHD 平衡）をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラスプラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、有望な磁場閉じ込め方式として挙げられます。我々の研究室では、これらの磁場閉じ込め超高温プラズマにおいて、プラズマ形状や磁場強度の非軸対称性が閉じ込め性能に及ぼす影響を実験解析と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

プラズマ中に大きな電流を流すトカマク方式では、理想的には回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、実際の装置では主たるコイルが回転方向（トロイダル方向）に離散的に設置されているため、わずかではありますがトロイダル方向に磁場強度の非一様性が存在し、この非軸対称性が核融合反応生成物であるアルファ粒子や高エネルギー粒子の損失をもたらす恐れが指摘されています。図1に示したのは、国際熱核融合実験炉 ITER に対する MHD 平衡計算で得られたプラズマ形状と磁場強度の等高線です。左図において薄い灰色で示されているのはトロイダル方向の磁場を作るためのトロイダルコイルの一部で、コイルとコイルの間で磁場強度が弱くなっており、非軸対称性が現れています。中図はこの非軸対称性を低減するために強磁性体であるフェライト鋼を配置した例で、非軸対称性は完全にはなくなっていますが、改善されている様子が分かります。ITER ではテスト・ブランケット・モジュール（TBM）が設置されますが、ここに強磁性体がいられるため、これが磁場強度構造に及ぼす影響を示したのが右図です。TBM 直下で強い非軸対称性が表れることが分かります。我々の研究室では現在、これらの非軸対称性がプラズマ閉じ込め性能に及ぼす影響を詳細に解析しています。

また、主に外部コイル系に流す電流だけで閉じ込めに適した磁場配位を作るヘリカル系方式では、プラズマ電流を駆動（通常は電磁誘導を用いる）する必要が無く定常運転に適しているなど多くの利点があるのですが、磁場配位を軸対称とすることができないので、その実験・理論解析には対称性を利用することができず、三次元解析が必要となるだけでなく、非軸対称性がプラズマの閉じ込め性能に悪影響を与えないように工夫が必要です。このため、我々は非軸対称性が存在しても優れたプラズマ閉じ込め性能が得られる磁場配位の最適化研究も行っています。

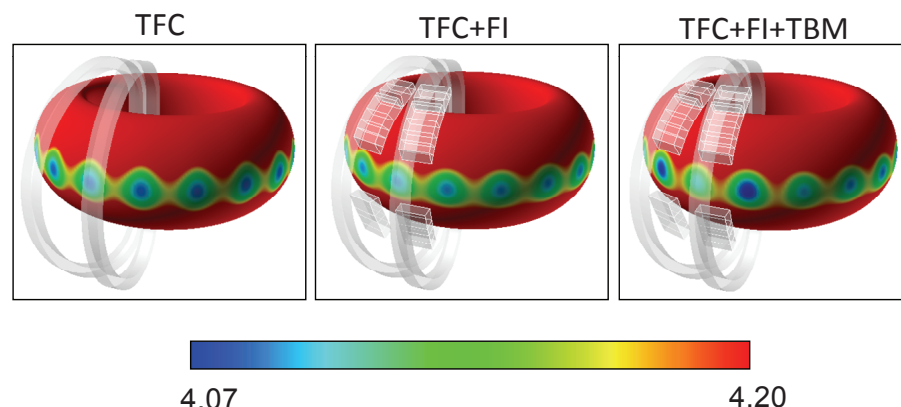


図1 コンピュータによる三次元 MHD 平衡の解析で明らかになった ITER トカマクにおける磁場強度の非軸対称性とフェライト鋼の影響

新設研究室紹介

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/labo-s.html>

「宇宙太陽発電所 SPS とマイクロ波無線電力伝送に関する研究」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS（Space Solar Power Station/Satellite）の実現を目指し、システム研究と共に基盤技術であるマイクロ波無線電力伝送技術、及びそのスピノフである大電力マイクロ波を用いた新材料創生の研究を 3つの柱として研究を行っている。

宇宙太陽発電所 SPS とは宇宙空間で太陽光発電を行い、その電力を無線（例えばマイクロ波）で地上へ伝送する将来の発電所構想である。100 万 kW 程度の電力を 2GHz 帯もしくは 5GHz 帯のマイクロ波に変換し、直径 2km 程度のフェーズドアレーアンテナから無線電力伝送を行う。当研究所では 1980 年以降様々な実証実験を通して SPS 実現のために研究を行ってきた。当研究室としては大規模フェーズドアレーのビームフォーミングに関する新しいアルゴリズムの理論検討と実験、マグネトロン（マイクロ波管）を用いた新しいフェーズドアレーの開発（特許）等を研究している。

また近年は SPS の基盤技術であるマイクロ波無線電力伝送技術の地上応用にも力を入れている。情報の無線化とデジタルデバイスの省電力化が実現したユビキタス情報社会は、人間のネットワーク化による社会革命を起こしつつある。しかし、そのネックとなっているのが電源である。人間はユビキタスに情報を得られるようにはなったが、ユビキタスに電力を得るようにはまだなっていない。そこで注目されるのが無線電力伝送とエネルギーハーベスティングである。両技術とも様々な方式が世界中で研究されているが、当研究室では主に SPS へつながるマイクロ波無線電力伝送技術を中心に研究開発を行い、対外的にすべての無線電力伝送とエネルギーハーベスティングを統合して推進すべく活動を行っている。近年は共同研究による FWA（Fixed Wireless Access）のためのミリ波レクテナ（受電整流アンテナ）の開発（図 1）（特許）、同じく共同研究による新規 GaN ダイオードを用いた大電力（現状 10W, 目標 100W）2.45GHz レクテナの開発、センサーネットワークへのマイクロ波無線電力伝送の応用、電気自動車無線充電システムの研究、コードレス建物の研究（特許）、共同研究による火星無人探査飛行機への無線給電システムの研究等を行っている。

さらにマイクロ波で無線電力伝送を行うためには大電力が必要であるが、現在の市場に大電力マイクロ波のニーズは少ないため、新たに大電力マイクロ波を用いた新材料創成の研究も開始した。マイクロ波加熱による新材料創成は、単なる加熱によるものとは比べ高機能の新材料が作れる場合があることが近年わかってきた。例えば太陽光感度波長のより広い TiO_2 をマイクロ波加熱で創成することに成功している（特許）。マイクロ波加熱は新材料創成の際にエネルギー効率や CO_2 排出量の観点からも有意な場合もあり、現在 NEDO の予算を得て木質バイオエタノール生産プロジェクトも推進中である（図 2）。

これらの研究は当研究所の電波暗室及びマイクロ波計測装置 METLAB 等を用いて行われている。当設備を含め複数の設備はマイクロ波・電磁波研究一般に利用可能で、全国共同利用設備として開放されている（<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/metlab/>）。

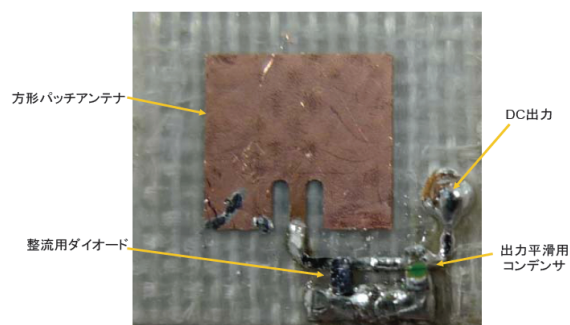


図 1 開発された 24GHz レクテナ（2009）

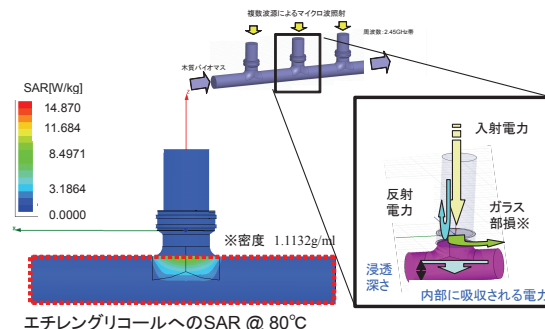


図 2 木質バイオエタノール前処理用マイクロ波加熱装置の計算機シミュレーション結果（2010）

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は、下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(*は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科(大学院)

電気工学専攻

複合システム論講座(土居研)#

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)*

電子工学専攻

集積機能工学講座(鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野(松重研)☆

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)*

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

ベンチャービジネスラボラトリー

通信情報システム専攻

通信システム工学講座ディジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(小山田研)

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab03/>

「拡散テンソル MRI を用いた精神疾患における白質病変の定量解析」

我々の研究室では、電気電子工学技術を基盤とする先端の生体計測、並びにそれを用いた中枢神経系の機能の解明や医療、福祉分野への応用研究を行っている。中でも磁気共鳴画像（MRI）を中心とした機能や形態の計測とイメージングを主要なテーマと位置づけている。MRI システムは現在広く臨床における画像診断に用いられており、印加する磁場の制御、磁気共鳴信号の計測、信号処理、画像化などの技術を統合し、一つのハードウェアで様々な情報を画像化することが可能なシステムである。近年、この MRI システムを用いて生体内の水分子の拡散情報を捉える MR 拡散強調画像（MR Diffusion-weighted Imaging; MR-DWI）が脳内白質構造の解明に広く用いられるようになり、例えば統合失調症といった精神疾患の病態研究においても、白質における神経線維の異常が認知不全など統合失調症に見られる症状と何らかの関係があるといった可能性が示唆されている。白質には大脳皮質間を結ぶ多くの神経線維束が張り巡らされているが、異方性など詳細な白質構造は従来の MRI では取得することができず、MR 拡散テンソル画像（MR Diffusion Tensor Imaging; MR-DTI）計測によりはじめて可能となった。詳細は参考文献 1 に挙げる解説を参照されたい。

当研究室では、MR-DTI 研究の一つとして精神神経科の研究者と共同で白質線維追跡法を用いた統合失調症患者の白質病変の研究を行なっている。近年、統合失調症にみられる認知不全や前頭葉機能低下は、その原因が大脳皮質の前側に位置する前頭前皮質と脳深部の視床や線条体と呼ばれる深部組織を接続する神経回路における何らかの障害・損傷に由来するとの仮説が認められつつある。そこで、我々は統合失調症患者群 20 名と健常者群 20 名の視床から内包前脚に抜けて前頭葉へ伸びる左右半球の神経線維束を MR-DTI を用いた神経線維追跡法により解析し、追跡開始領域における線維束断面積を比較すると、統合失調症患者においてこの部位の白質線維接続が、線維の絶対量は変化していないもののその走行方向に異常をきたしている可能性が高いことを見だし報告した [2]。図 1 は、この解析法により得られた健常者における白質線維追跡結果の例を示している。現在さらに、精神疾患の定量評価を目指し、大脳半球内を前後に走行する代表的な神経線維束である上縦束 [3] や他の神経線維束の解析を進めている。また、この白質線維追跡法が躁鬱病の白質病変解析にも有効である事を報告している [4]。MR-DTI は、精神疾患の解明、診断、治療効果の評価に有用であり、今後も医学系の研究者との密な連携により医療や脳科学に貢献する研究を進める。

【参考文献】

- [1] 小林哲生：” MRI 技術の最前線：拡散 MRI とその脳機能計測・白質病変解析への応用（解説）”，システム制御情報学会誌，Vol.54, No.2, pp.58-65 (2010)
- [2] S. Kito, J. Jung, T. Kobayashi and Y. Koga: European Psychiatry, Vol.24, pp.269-274 (2009)
- [3] 山本詩子，小林哲生，鬼頭伸輔，古賀良彦：電気学会論文誌 C，Vol.130-C, No.5, pp.799-806 (2010)
- [4] A. Ikeda, S. Kito, J. Jung, T. Kobayashi and Y. Koga: J of Inter. Soc. of Life Information Science, Vol.28, No.1, pp.14-22 (2010)

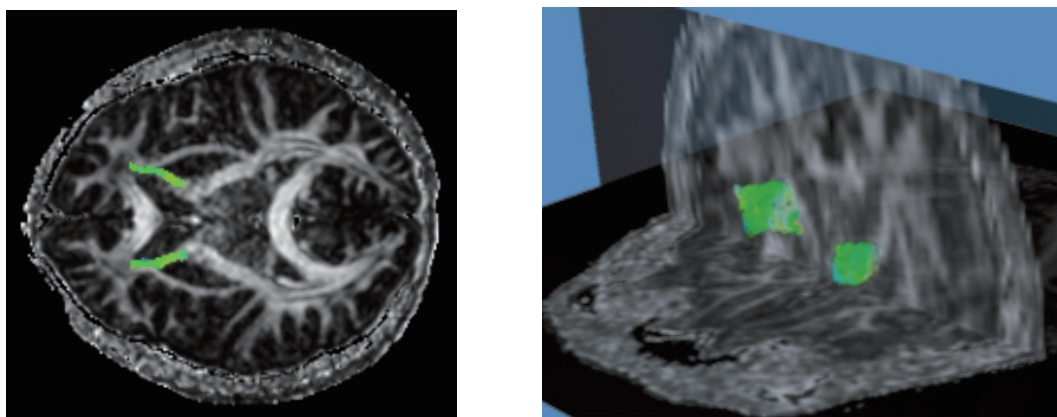


図 1 視床から内包前脚に抜けて前頭葉へ伸びる神経線維追跡結果の例。（左）x-y 断面，（右）3D 表示

電気システム論講座 電気回路網学分野（和田研究室）

<http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「電力潮流の時間変化を利用した送電線の線路パラメータの決定」

多様化する電力ネットワークの中で、安定な電力供給を維持するためには、送電線のインピーダンスなどの線路パラメータを正確に把握することが、従来にも増して重要となってきた。線路パラメータは、従来鉄塔や送電線の幾何学的配置から Carson-Pollarczek の式などに基づいて計算されてきたが、大地から送電線までの距離、大地の状態、線の配置など、正確な値を与えるのが難しいパラメータを含んでおり、計算された線路パラメータは精度が低いものであった。一方で、比較的正確に線路パラメータを測定する方法として、1 線ずつ電圧をかけるなどの特別な系統操作を実施して実測する方法もあるが、多大な労力と線路の停止などが必要となる一方で、必ずしも正確な値が得られないため、現実的な手法とはなっていない。そのような中、GPS システムを用いて常時電圧電流のフェーズ値を測定できる PMU (Phasor Measurement Unit) が開発され、種々の応用が期待されている (図 1 左)。

本研究は、PMU によって得られる常時測定膨大な測定データを利用することにより、電力潮流の時間変化だけで特別な系統操作なしに正確な線路パラメータを把握しようという試みである。この方法の実現には、膨大なデータからパラメータ決定に必要な潮流状態をみつけだし、膨大なデータを利用した信号処理により S/N 比を上げることが重要となる。これまでに、図 1 右にあるような三相 1 回線送電線のパラメータ同定に必要な条件を与え、さらに 2 回線送電線の場合には鉄塔の対称性を利用してモード分解を行うことにより (図 2)、効率的にパラメータ同定する方法を提案している [1]。また、電機メーカーと電力会社の協力により、実際の電力送電線の測定も実施し、提案手法の妥当性について検討中である。

<参考文献>

[1] M. Kato, T. Hisakado, H. Takani, H. Umezaki K. Sekiguchi, "Live Line Measurement of Untransposed Three Phase Transmission Line Parameters for Relay Settings," Proc. IEEE PES General Meeting 2010, No.377 pp.1-8, 2010.

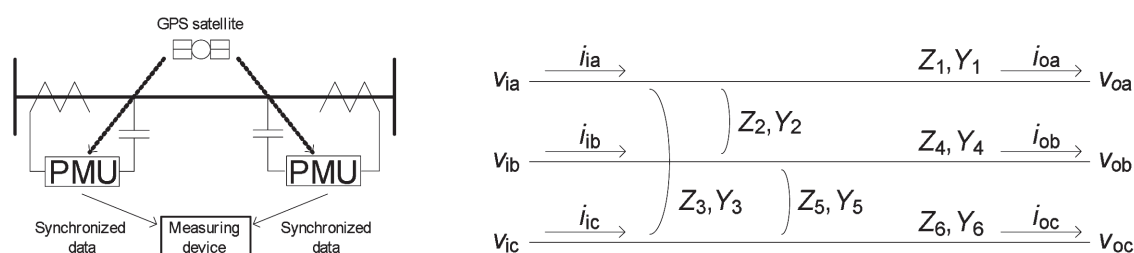


図 1: GPS 同期した PMU を用いた計測の模式図と、三相 1 回線送電線の線路パラメータ。

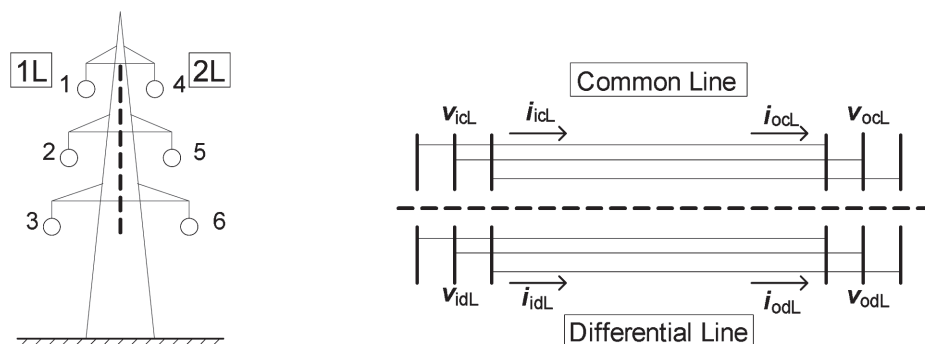


図 2: 鉄塔構造の対称性に基づいて同相 (Common) 差動 (Differential) 分解された三相 2 回線の線路

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

ロバスト制御理論の基盤としての線形代数的研究の一端

—ブロック市松・ブロック対角変換を例として

1. ロバスト制御の意義とその理論的基礎を与えるスケーリング手法

cue の第 23 号において、本研究室で取り組んでいる制御工学に関する理論的研究の一端を紹介した。具体的には、実システムの制御において必ず行われる制御対象の数式モデル化とその際に必然的に生じるモデル化誤差について述べ、その影響を考慮してもなお所望の制御性能が達成されることを保証するフィードバック制御、すなわちロバスト制御の重要性について紹介した。

ロバスト制御の観点では、あらゆる制御系は図 1 のように、何らかの既知のシステム G と、モデル化誤差に相当する不確かさ Δ との閉ループ系とみることができる。 G はいかなる制御器を設計するかによって変化するものであり、 G に所望の性質を持たせることのできる制御器を設計するためのできるだけ強力な理論基盤を与えることが、ロバスト制御理論の役割である。図 1 において、不確かさ Δ の持ちうる最大のゲインと G のゲインの積が 1 未満になるように制御器を設計できれば、制御系は安定となる。このことは、制御対象の（モデル化誤差による）不正確な情報しかなくても有効な制御系設計が可能となることを意味し、その工学的意義は大きい。これがロバスト制御理論の最大の基礎を与える考え方であるが、そのままではあまり強力な理論基盤に発展せず、工夫が必要である。

ここで、もし、どんな不確かさ Δ についても $\Delta = W^{-1} \Delta W$ が成立するような W （の集合）が存在したと考えてみよう。このとき、図 1 は、 G を WGW^{-1} と置き換えても同じ閉ループ系を表すことになる。よって、「 Δ の持ちうる最大のゲインと WGW^{-1} のゲインの積が 1 未満になる W が存在する」ことがより重要であることになる。ここで、 WGW^{-1} は G のスケーリングと呼ばれ、一般には G 自身とは異なるものになる。 W を恒等作用素に限定せず W （の集合）の自由度を利用すれば、より強力な理論が構築できる可能性があるということである。

2. ロバスト制御理論新展開の一端紹介—高速リフティング、ブロック市松・ブロック対角変換の周辺

上記のような考え方を通してロバスト制御理論は目覚ましい発展を遂げているが、そのような理論も、現状のままでは限界がある。そのもっとも単純な例が、 G, Δ がスカラの場合である。その場合には $WGW^{-1} = G$ となってしまうことから、 W を導入しても何ら新たな効果を生み出せないからである。この問題を解消するばかりでなく、もっと一般的な状況でも大きな効果を発揮する考え方として、当研究室では、非因果的なスケーリングを提唱し、これを利用したロバスト制御理論の枠組みの展開を精力的に進めている。そのさらなる理論基盤の一つに高速リフティングがある。紙面の都合上、相当に雑な説明となるが、高速リフティングを介した非因果的なスケーリングとは、上記における W の作用が、たとえば $u(t); kT \leq t < (k+1)T$ を $\tilde{W}\tilde{u}_k$ という関数に写像するようなものである。ここで、 \tilde{u}_k は、区間 $kT \leq t < (k+1)T$ を 3 等分し、それに応じて $u(t)$ も 3 等分したものを縦に並べたベクトル関数であり、 \tilde{W} は 3×3 の行列である。このような W が $W^{-1} \Delta W = \Delta$ を満たすためには、一般的な状況で考えれば、行列 \tilde{W} はブロック市松行列と呼ぶ図 2 のような複雑な（零 / 非零）構造を持つ必要がある。この構造の複雑さが理論の記述や数値計算において何かと厄介を引き起こすが、適切に定義される置換を通してこれは図 3 のようなより単純なブロック対角構造に変換できる。一方で、図 2 から図 4 のような中間的な構造を介してから図 3 に変換することが可能であるなど、この変換が持つ自由度や数学的構造は非因果性を高めるにつれてさらに複雑になる。そういった性質やその利用法の明確化を一端として含む理論的課題に取り組み、非因果的なスケーリングに基づくロバスト制御理論の新展開を図っている。

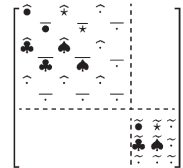
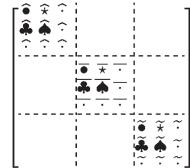
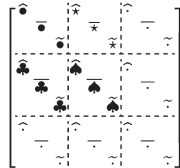
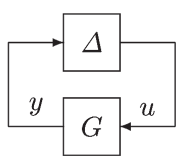


図 1 ロバスト制御の視点

図 2 ブロック市松行列

図 3 ブロック対角行列

図 4 中間的な行列

電気システム論講座 電力システム分野

<http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/gse/ee/powersystem>

「真空遮断器の高電圧化に関する基礎研究」

当研究室では電力システムの潮流計算や安定度解析手法の開発の他に、システム構成要素の絶縁技術に関する基礎研究も行っています。近年取り組んでいる課題の一つに高電圧真空遮断器の開発があります。これは、地球温暖化問題を背景に、現在の高電圧ガス遮断器の代替として真空遮断器を採用しようとするものです。真空遮断器の高電圧化では我が国が世界に先駆けており、既に定格電圧 80 kV までが電力システム等で使われていますが、将来はより高い電圧階級への適用が検討されています。国内では一点切りで 140 kV 級の遮断器も開発されています。高電圧化の課題として、消弧や冷却方式の観点もありますが、我々は電気絶縁の問題に取り組んでいます。真空中の絶縁では、一般に、金属電極が対面した真空ギャップ放電に比べて、電極を支える固体絶縁支持物の表面に沿った沿面放電の電圧が低いいため、我々は特に沿面絶縁を研究対象としています。真空中では絶縁支持物が陰極から放出される電子の衝撃を受けて帯電し、これが引き金になって沿面放電へ進展すると考えられますので、この帯電の機構や帯電分布を把握することが重要になります。電流遮断は真空バルブ内で行われ、このバルブはアルミナセラミックなどを材料とする円筒で、真空容器と電極支持の役割を担っており、内部が真空環境です。

円筒形状であるため、電圧を印加して内面を帯電させると、その電荷からの電束は円筒材料を通して円筒の外にも届きます。そこで、図 1 のように、外部（大気圧）にプローブを置くと静電誘導によって帯電の様子がわかります。この測定系ではプローブが上下に可動で、また円筒試料が回転しますので、試料全体のスキャンが可能になっています。図 2 が測定結果の一例で、試料は長さ 55 mm、外形 55 mm、内径 50 mm のアルミナ製円筒です。図のように、プローブに誘導した電荷は陰極近くで大きく、陽極に向けて小さくなる山型をしています。また、円周方向にも電荷の不均一性が見えます。このように、円筒内面の帯電の様子が次第に明らかになりつつあります^[1]。真空中の帯電現象は、気体中や液体中の帯電現象には無い特徴として、電荷分布を理論的に評価できますので、シミュレーション結果との対比や、電界緩和用電極による帯電抑制効果についても検討しています。

なお、遮断器に限らず、X 線管やマイクロ波管など真空環境を応用する多くの高電圧機器は何らかの形状のバルブを使いますので、本研究の結果はそれらの機器の絶縁にも応用できると期待できます。

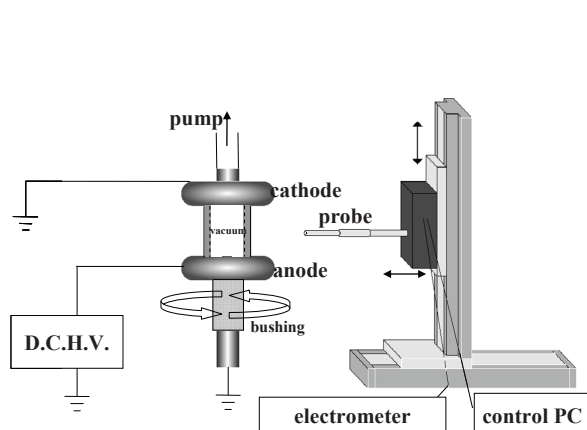


図 1 可動型静電プローブと円筒試料

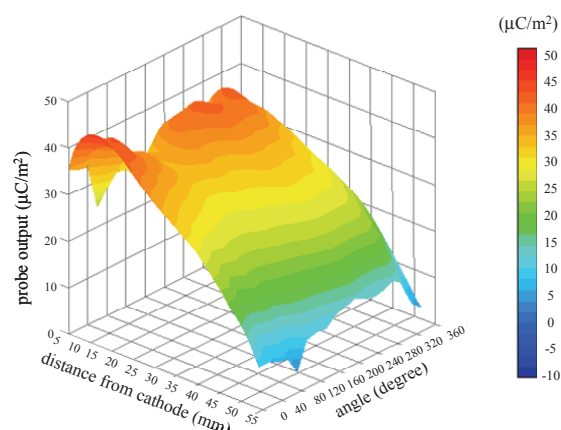


図 1 可動型静電プローブと円筒試料

- [1] Y. Shimizu, H. Morii, O. Yamamoto; "Study on Surface Charge Distribution of an Insulating Hollow Cylinder in Vacuum", Proc. of 24th ISDEIV. Vol.1, pp 100-103 (2010)

電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野 (<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>) 「チェーン状プラズマに沿った局在表面波モードによる可変電磁波導波路の形成」

当研究室の研究テーマである「プラズマ」の電気的な特性を考えてみますと、荷電粒子を含むことで生じる導電性を頭に浮かべることができます。この導電性という性質は、より広い意味では物質のもつ誘電性の中で理解でき、その観点においてプラズマは正から負の値にわたって幅広い比誘電率値を示します。誘電率が負となることで、通常電磁波はプラズマ中を伝搬することができずにその表面で反射されますが、この性質を用いて上空の電離層でのラジオ波の反射による長距離伝送が可能となり、地球上で遠く離れた場所への放送等の情報伝送がなされます。

当研究室では、このようなプラズマの性質を身近に利用する可能性を探るため、様々な検討を行ってきました。すなわち、プラズマを微小化し、また大気圧動作させる様々な様式を提案する中で、手のひら上に形状を制御された形でプラズマを手にすることが可能となり、現在その電磁波応答を調べています [1]。なかでも、最近取り組んでいるのは、携帯電話やローカルエリアネットワーク (LAN) と同じ GHz 帯周波数でのチェーン状プラズマを用いた電磁波伝搬の制御です。先ほど述べましたように、プラズマの生成条件を調整することでプラズマの比誘電率を少し負の値 (-1 程度) に設定することができ、また空間寸法として 1 mm 内外のプラズマを整列させて生成することができるようになってきました。そこで、折れ曲がりや分岐を含んだチェーン状プラズマ構造を自在に生成し、それに沿った電磁波伝搬を理論及び実験で観測しております。

図 1 に、直線型のチェーン状プラズマ構造に沿った電磁波伝搬の計算結果とその実証実験におけるプラズマ発光パターンを示します。また、図 2 には、十字型分岐構造による電磁波の分波現象の計算結果を示します。いずれにおいても、電磁波はプラズマ内には存在せず、その周囲に巻き付く様な表面波形状で局在化していますが、これは比誘電率を -1 程度と調整することで実現します。そのような局在構造はサイズとしては自由空間波長よりも十分に小さく、それらが連続的につらなることで波長オーダーの伝搬が実現されます。ここで、チェーンに沿って定在波が生じるようなことは概してなく、これはプラズマの周囲に局在するときにすでに円周方向に定在していることでも理解できます。この電磁波伝搬のスペクトルを実験において観測してみると、1-10 GHz の広範囲の周波数帯で断続的に検出されました。このように広帯域化しているのは個々のプラズマの周辺にて電子密度の空間勾配が有意に存在しているためと解釈できます。以上のように、この現象はわかりやすいツールとしての有用性と同時に、波動伝搬の物理としても興味深い内容を数多く含んでいます。

本研究内容は、光波領域で盛んに研究されている表面プラズモン現象と共通点が多く、将来的にはマイクロ波から光波領域で連続的に電磁波の導波を制御するスキームの構築につながるものと考えております。その意味では、本研究内容は、“低周波プラズモニクス”と呼ぶこともできるでしょう。また、個々のプラズマのオンオフや強度調整を行うことで様々な導波路パターンの組み合わせが構成でき、さらに時間的な可変性も確保できるので、高周波複素関数の機能の発現やその計測応用も視野に入れて研究を推進しています。

参考文献

[1] 井井道, 橘邦英, 「マイクロプラズマによる電磁波メタマテリアル」, 応用物理, 78 巻, pp. 437-441 (2009).

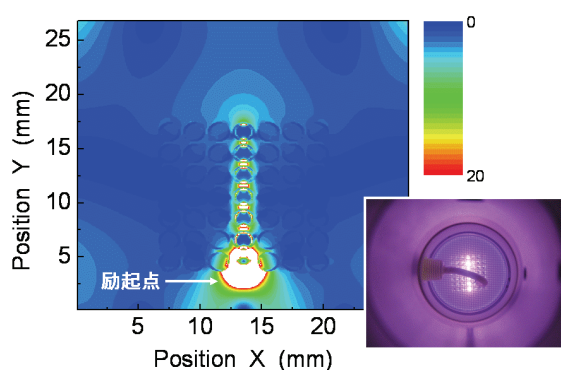


図 1. 直線型のチェーン状プラズマによる周波数 6 GHz の電磁波の導波現象。挿入図は、この計算結果を実証した実験でのプラズマ点灯の様子。

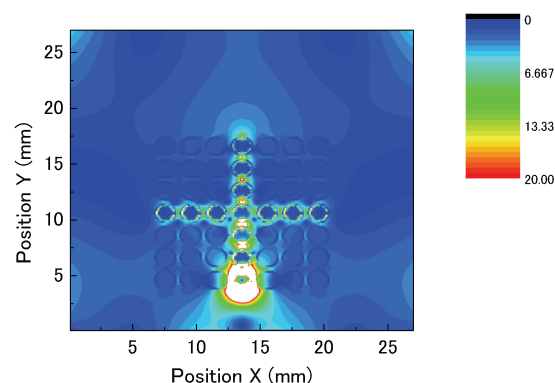


図 2. 十字型チェーン状プラズマによる分波現象の数値計算結果。

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

ビーム出射方向を自在に制御可能な半導体レーザ

フォトニック結晶は、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつ新しい光学材料であり、固体結晶中の周期的なクーロンポテンシャル分布によって電子の分散曲線にバンド構造が生じるのと同様に、光子の分散曲線にバンド構造が生じることを特徴とする。本研究室ではこのフォトニック結晶の特異なバンド構造を用いて、これまでにない光の制御を実現することを目指し様々な研究を行っている。その中から以下では最近開発に成功したビーム出射方向を自在に制御可能な半導体レーザについて紹介する。

半導体レーザを利用する上で、レーザビームの方向を変化させる機能は様々な応用において重要である。しかし、現状の半導体レーザでは出射ビーム方向は固定されているため、外部に設置した反射鏡の向きを機械的に制御することによりビームの方向を変化させている。そのため、(i)小型化が困難である、(ii) 耐久性が悪い、(iii) 動作スピードが遅い、などの課題が存在する。

これに対して、本研究室ではフォトニック結晶を用いることで、半導体レーザそのもので、ビーム出射方向を自在に制御することに成功した。具体的には、2種類の少しずつ周期の異なるフォトニック結晶を組み合わせることにより、様々な角度にビームが出射可能な共振（発振）状態が形成できることを見出し、かつ、この共振器を実際にレーザ共振器として用いることにより、様々な角度にビームが出射可能となることを初めて示した。この成果は、外部光学系なしに、レーザ単体でビーム方向を高速に、自在に操作することのできる全く新しいレーザの誕生を意味するものであり、半導体レーザの新たな方向性を示す極めて重要な成果である。レーザディスプレイ、超小型レーザレーダ探知システム、チップ間光インターコネクションなど、次世代型光システムの新たなレーザ光源として、極めて有望な技術と言え、

2010年5月2日（英国時間）に英国科学雑誌「Nature Photonics（ネイチャー・フォトリクス）」のオンライン速報版で公開された。

参考文献

[1] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda: "On-chip beam-steering photonic-crystal lasers", Nature Photonics, vol. 4, pp. 447-450 (2010).

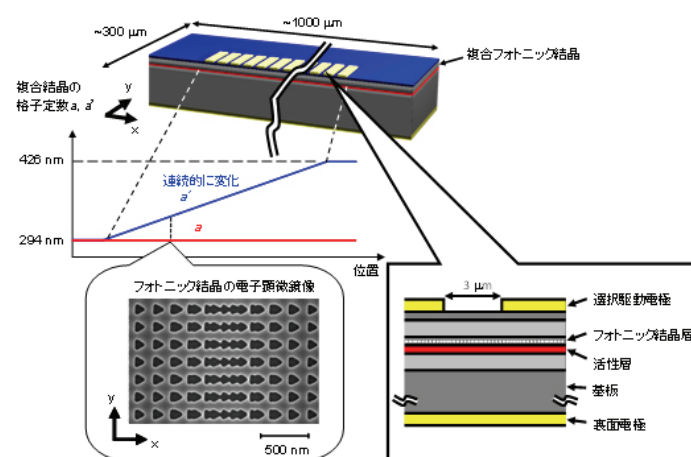


図 1. ビーム偏光レーザの構造

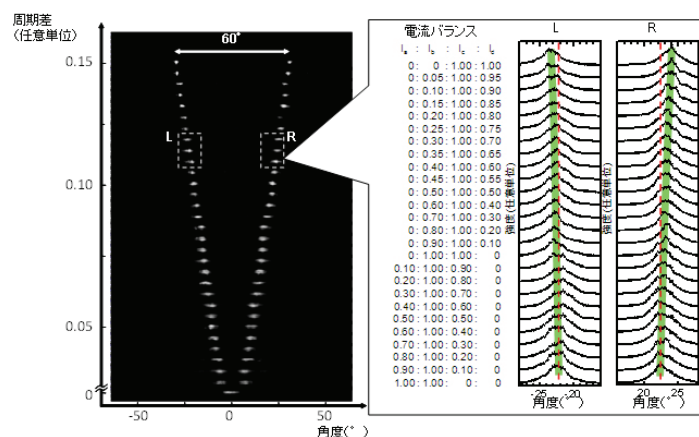


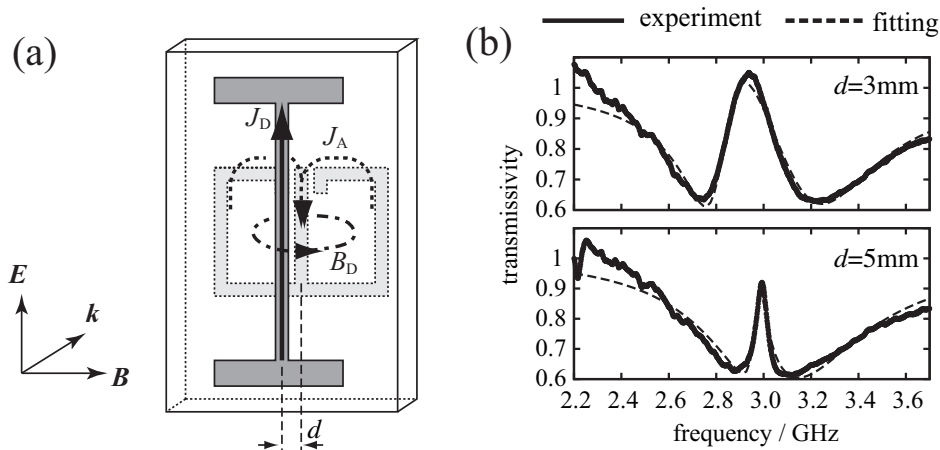
図 2. ビーム偏光動作の実験結果

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab15>

「二重リング共振器を用いた電磁誘起透明化現象の実現」

電磁誘起透明化現象 (EIT) とは, 3 準位原子系に対してコントロール光を入射することで, プローブ光の吸収が消失する現象のことを指す [1]. この吸収の消失は非常に狭い周波数領域で起こるために, 屈折率もその領域で大きく変化し, その結果, 光の群速度が非常に小さくなる. この研究は現在, 光を止める技術へと広がっている. EIT 現象は, 量子特有の現象ではなく, Q 値の異なる共振器間の結合でも同様の現象が起こることが示されている [2]. これ利用したメタ物質における EIT 現象についての研究も盛んに行われている [3]. メタ物質を用いることで, 対象となる電磁波の周波数を含めた様々なパラメータを自由に設計することができる. 本研究では, Q 値の低い共振として電気ダイポール共振を, Q 値の高い共振として 2 重リング共振器の反対称共振を用いた. 図 (a) にその構造と電磁場の伝搬方向および電場 E , 磁場 B の向きを示した. 表面の I 型の構造が電気ダイポールアンテナとしてはたらく, 裏面の ω 型の構造が二重リング共振器としてはたらく. 電磁波の電場成分によって, 電気ダイポールアンテナに電流 J_D が誘起される. この電流はアンテナの周りに磁場 B_D を作り出す. このとき, 2 重リング構造に逆向きに磁場が貫くので, 左右のリングには逆向きの電流 J_A が誘起される. 電気ダイポールに誘起される電気双極子モーメントの放射損失に対して, 反対称ループ電流の放射損失は小さいために, 両者の共振周波数を一致させることで EIT 現象が起こる. 透明化領域の幅は, 両共振器間の結合が小さくなるほど狭くなる. つまり, 両共振器の中心軸の距離 d を大きくするほど狭い透明化窓が現れることが予想される. 実験的検証のために低誘電率 PPE プリント基板 (Risho CS-3376C) 上に両構造を作成し, 実験を行った. 両共振器の中心軸の距離が $d = 3\text{mm}$, 5mm の 2 種類のメタ物質 1 層に対して透過率を測定した結果を図 (b) に実線で示した. いずれの場合も, EIT 現象特有の狭帯域透過現象が 3.0 GHz 付近で観測されている. 透明化領域の帯域は d が大きいほど狭く, 理論通りの結果を得ている. 点線は, 理論式によるフィッティング曲線であり, これも実験で得た値とよい一致を示している. このようなメタ物質を利用することで, 電磁波の群速度を制御することができる. この特性により, 電磁波の遅延量の制御, 電磁波の非線形現象の増大, 電磁波の変調などへの応用が期待される.

[1] S. Harris: Phys. Today **50**, 36 (1997).[2] C. L. Garrido Alzar *et al.*: Am. J. Phys. **70**, 37 (2002).[3] V. Fedotov *et al.*: PRL **99**, 147401 (2007). S. Zhang *et al.*: PRL **101**, 047401 (2008). N. Papasimakis *et al.*: PRL **101**, 253903 (2008). P. Tassin *et al.*: PRL **102**, 053901 (2009). T. Koschny *et al.*: PRL **93**, 107402 (2004). Y. Tamayama *et al.*: PRB **82**, 165130 (2010).

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

<http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/japanese/index.html>

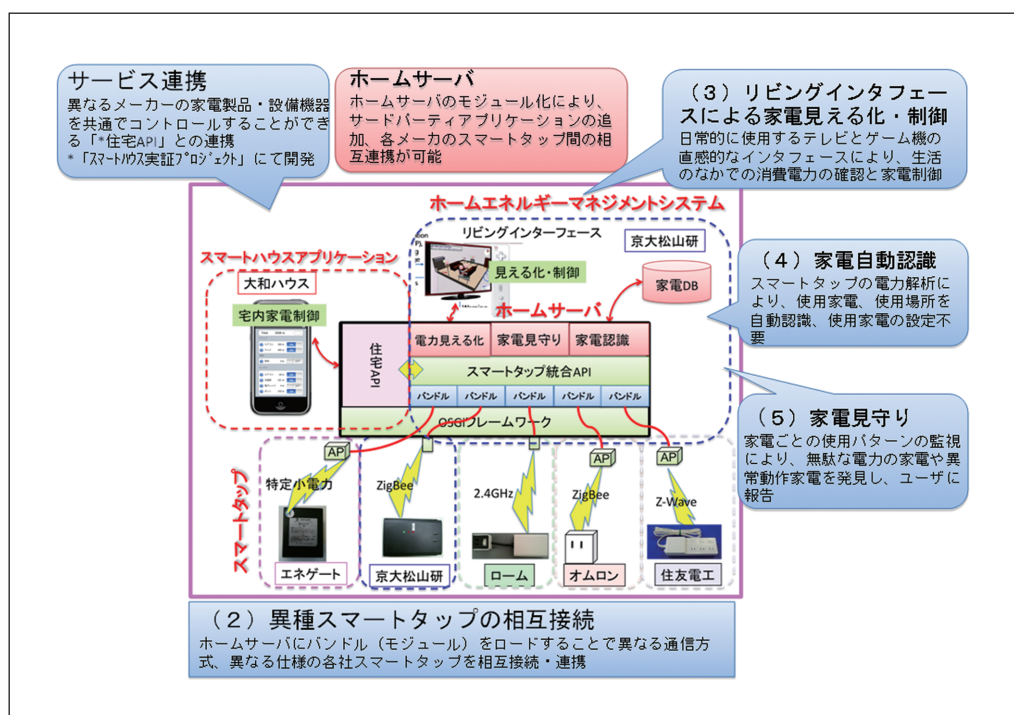
「スマートマンションルーム」

本研究室では、数年前から「エネルギーの情報化」（本誌 No.23, pp.3-8, 2010）という新たなエネルギーマネジメントの考え方を提唱し、それを実現するための研究開発を進めています。

「エネルギーの情報化」を実現するための第一段階は、家庭・オフィス内のすべての電気機器に、高精度電力計測・信号処理・通信機能を備えた「スマートタップ」を付け、エネルギー消費のリアルタイム計測・表示、人間・電気機器の安全安心見守り、省エネコンサルティングなどを行う「エネルギー消費の見える化」システムの開発です。

本年度前半には、同システムの実証実験として、京都市内の 1LDK（33 平米）のマンションルーム内の全ての電気機器（約 50 台）に、京都大学松山研究室、株式会社エネゲート、オムロン株式会社、住友電気工業株式会社、ローム株式会社、NICT 委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」プロジェクトがそれぞれ開発したスマートタップを付け、6 月より実際の生活を行いデータ収集、分析を行い、9 月には以下の機能を備えたシステムの公開デモを行いました。

1. スマートタップを使った、家電の詳細な電流・電圧波形計測や消費電力のリアルタイム計測と表示
2. 異なったメーカーが開発したスマートタップを統合するホームサーバシステム
3. 消費電力の見える化による省エネ支援システム：リビングのテレビとゲーム機を使って、日々の暮らしの中で各家電の電力消費の状態を調べたり、無駄な電気の削減を気軽に行えるシステム
4. スマートタップによる家電の自動認識：スマートタップで計測された電流波形を解析することにより、家電をコンセントに差すだけで、家電の種類を自動認識するソフトウェア
5. 家電の安全見守り・異常発見：家電の詳細な電流波形特性をリアルタイムに解析・監視することによって、機器の異常・不具合を自動検出・通報し、火災などの事故の予防に努めるソフトウェア



通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

<http://cube.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「光ファイバ遅延線バッファ構成法の研究」

光ファイバ（FTTH）の普及とともに、ネットワークを流れる情報量は飛躍的な成長を続けています。大量の情報を伝送するために、基幹網では光ファイバによる波長多重伝送技術が使われています。一方、ネットワークの内部で情報の交通整理を行うルータは、電子回路で構成されているため、処理能力が制約されています。そこで、光信号のままパケット情報をルーティングする光パケットルータの研究を行っています。

ルータでは、ひとつの出口に同時に複数のパケットが出力しようとするとうパケット衝突が起こるため、バッファで順番待ちをする必要があります。光ルータでは、ファイバ遅延線バッファを使用します。さまざまな長さの光ファイバ遅延線を用意し、ほかのパケットと衝突しないような長さの遅延線を選び、パケットを入力します（図1）。一方現在のルータは電子回路で構成されており、パケットの衝突回避にメモリを用いています。メモリを用いたバッファは、①任意の時刻にパケットを読み出して送信することができ、②メモリ容量が大きいため大量のパケットを蓄積できるのに対し、遅延線バッファは、離散的な値の遅延しか与えられず、かつ容量も小さいという短所があります。遅延時間が離散的であると、送信される2つのパケットの間に無駄な時間（パケット間ギャップ）が発生し、ネットワークの利用効率が劣化します。性能を向上するために、可変遅延線を固定遅延線と組み合わせる方法を考えました。パケット間ギャップを短くするための遅延時間の制御方法などを検討し、最大で42%の性能向上を達成しました（図2）。また、パケット長により品質が異なる問題の分析と対応方法も検討しています。

文献

- [1] 岩井他 “可変遅延線を用いたファイバ遅延線バッファの構成法”，信学論，Vol.J93-B No.6, pp.813-821, Jul. 2010
- [2] 岩井他 “可変長パケットにおける可変遅延線を用いたファイバ遅延線バッファの構成法”，信学論，Vol.J94-B No.1, pp.14-23, Jan. 2011

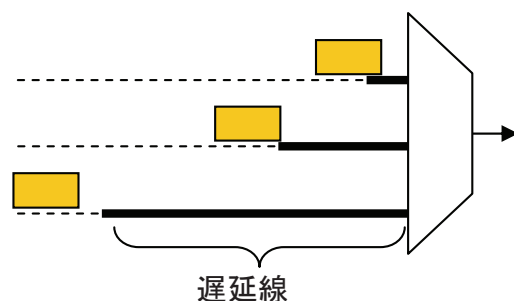


図1 遅延線バッファ

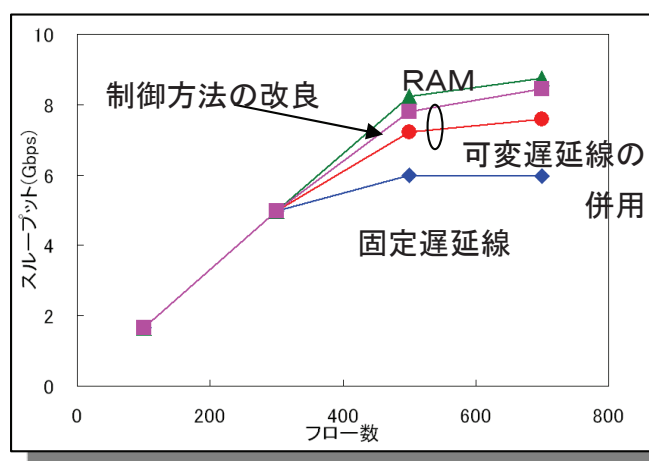


図2 遅延線バッファのスループット

集積システム工学講座 情報回路方式分野（佐藤高研究室）

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「逐次重点的サンプリングを用いた SRAM 歩留まり解析手法」

半導体プロセスの微細化に伴い素子特性のばらつきが回路歩留まり低下の原因として支配的になっている。素子の微細化と高集積化をさらにすすめるためには、これまで以上に有益な応用を生み出すには、要素回路である SRAM 回路の最適設計が特に重要である。これまで行われてきたワーストケース解析では必要以上に悲観的な見積りとなるため、モンテカルロ (MC) 法に代表される統計的解析手法が適用され始めている。MC 法では、ばらつき情報に基づいて各素子の各パラメータを乱数により決定し、SPICE シミュレーションにより不良品の判定を行う。十分なサンプル数を用いれば、正確な歩留まり解析が可能となる。しかし、SRAM メモリセルの不良は稀にしか発現しないため、正しい歩留まりを得るには膨大な計算時間を要する。たとえば 32Mbit SRAM を歩留まり 90% で製造する場合、各セルに要求される不良率は 3×10^{-9} 以下となる。この場合、信頼区間 90%、精度 90% の時、 3.3×10^{10} のサンプル数が必要となる。既存の MC 法高速化手法として、図 1 (a) のように不良品となるパラメータ空間（不良領域）付近に重点的にサンプルを発生させる、重点的サンプリング (IS) 法がある [1]。しかし、ばらつきを考慮すべきパラメータが増加して探索空間が広くなると、代替分布の適切な選択が難しく、精度の悪化や解析時間の増大を招く等の課題があった。

以上のような背景のもと、本研究室では、逐次重点的サンプリングによる歩留まり解析の高速化手法を提案している [2]。この手法では、不良の起こりやすさに応じた粒子（サンプル）配置を乱択プロセスにより逐次的・適応的に得るため、図 1 (b) のようにメモリセルの不良領域の分布に従うサンプルを用いて IS を行うことができる。不良領域のみを辿って回路歩留まりへの寄与が大きい領域を見つけ、その歩留まりへの寄与に応じたサンプルを発生できることから、低不良率ならびに高次元の場合にも効率の良い解析が可能となる。

図 2 のような 6 トランジスタ SRAM の不良率解析に提案手法を適用した。全てのトランジスタの閾値電圧をばらつきパラメータとする場合（6 変数）について、本手法と手法 [1] の比較結果を図 3 に示す。横軸は SPICE の実行回数、縦軸は不良率であり、少ない回数、すなわち図の左の方で収束を得るほど、早く歩留まりが計算できることを意味する。手法 [1] については、IS に用いる代替分布算出に用いるサンプル数として 10^4 と 10^5 の 2 通りとしている。

提案手法では 10^4 回の SPICE 実行で 3×10^{-9} という正確な不良率が得られた。この結果は、一般的な MC 法に対し 3.3×10^6 倍の高速化に相当する。また、手法 [1] に対しても 50 倍以上高速である。さらに、手法 [1] では低不良率や高次元の場合に探索すべき空間が指数関数的に大きくなるため対応できなくなるのに対し、提案手法では、閾値電圧に加えてゲート長、酸化膜厚、キャリア移動度もばらつきパラメータとする 24 変数の場合でも正しく歩留まりが求められる。今後の課題としては、提案手法における粒子の初期配置決定手法の検討や SRAM 以外への応用が考えられる。

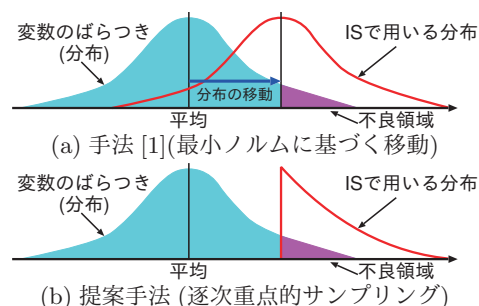


図 1: 重点的サンプリング

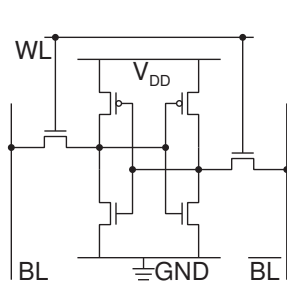


図 2: SRAM メモリセル

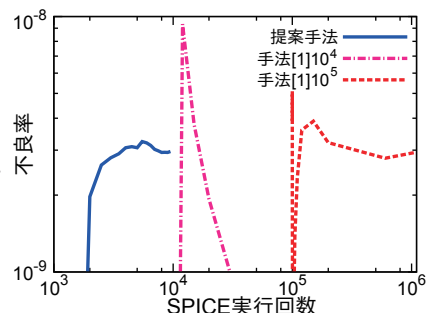


図 3: 提案手法と手法 [1] の比較

参考文献

- [1] L. Dolecek, M. Qazi, D. Shah, and A. Chandrakasan, "Breaking the simulation barrier: SRAM evaluation through norm minimization," in *Proc. ICCAD*, Nov. 2008, pp. 322-329.
- [2] K. Katayama, S. Hagiwara, H. Tsutsui, H. Ochi, and T. Sato, "Sequential importance sampling for low-probability and high-dimensional SRAM yield analysis," in *Proc. ICCAD*, Nov. 2010, pp. 703-708.

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「南極大気レーダー信号処理に関する研究」

昭和基地において建設が始まっている南極昭和基地大気観測計画 (PANSY) レーダーは、わが国の南極観測史上最大のプロジェクトであると同時に、日本が建設するレーダーとしても最大規模のものとなります。中心周波数 47MHz、ピーク送信出力 500kW のパルスドップラーレーダーで、1045 本の八木アンテナにより構成される直径 160m のアクティブフェーズドアレイアンテナを備えます。高度 1.5km ~ 600km の大気屈折率の擾乱からの散乱エコーを受信して大気の運動を連続的にモニターし、オゾンホールを始めとする気象現象や気候変動などの解明に貢献することが期待されています[1]。当研究室は、このレーダーのアンテナ開発やシステム設計を主に担当してきました。

この種のレーダーは極めて微弱な散乱信号を受信するため、周囲の山などによる不要反射波(クラッタ)が大きな障害となります。特に南極では、オーロラに起因する強い沿磁力線擾乱 (FAI) エコーと、電離圏自由電子によるインコヒーレント散乱が混在し、その分離が重要な技術課題の一つです。

当研究室ではこれまでアダプティブアンテナ技術を用いた大気レーダーの不要信号除去の研究を進めてきました。MU レーダーのクラッタ除去の他、赤道大気レーダーのマルチスタティック受信実験において、アンテナ利得が低く信号対クラッタ比の不利な受信専用アレイの信号処理で有効性を実証しています[2]。PANSY レーダーにおける FAI エコーは、時間変動が激しく適応的除去が特に困難と予想されます。適応的処理に加えて目標追尾技術を統合することにより問題の解決を目指しています。

参考文献

- [1] 日経サイエンス 2011 年 1 月号, Vol.41, No.1, pp. 34-43, 2011.
- [2] K. Nishimura, T. Harada, and T. Sato, J. Meteor. Soc. Japan., Vol.88, No.3, pp. 409-424, 2010.

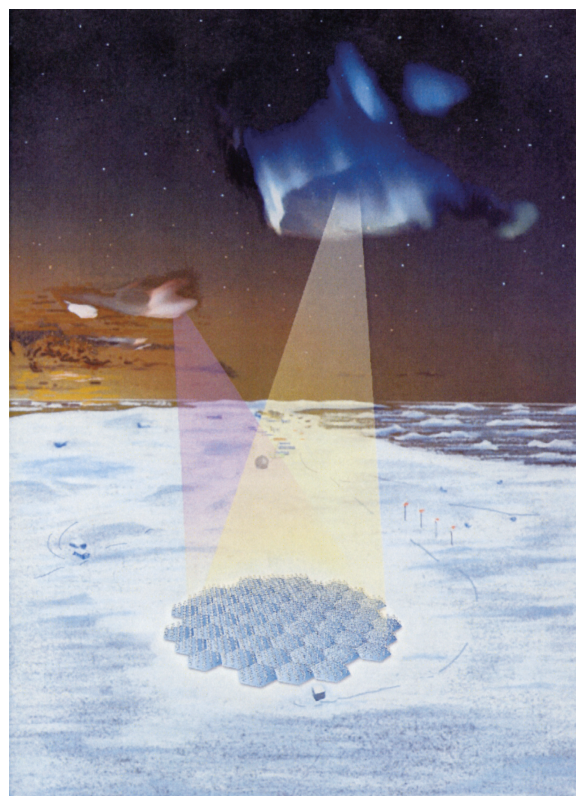


図 1. PANSY レーダーの完成予想図

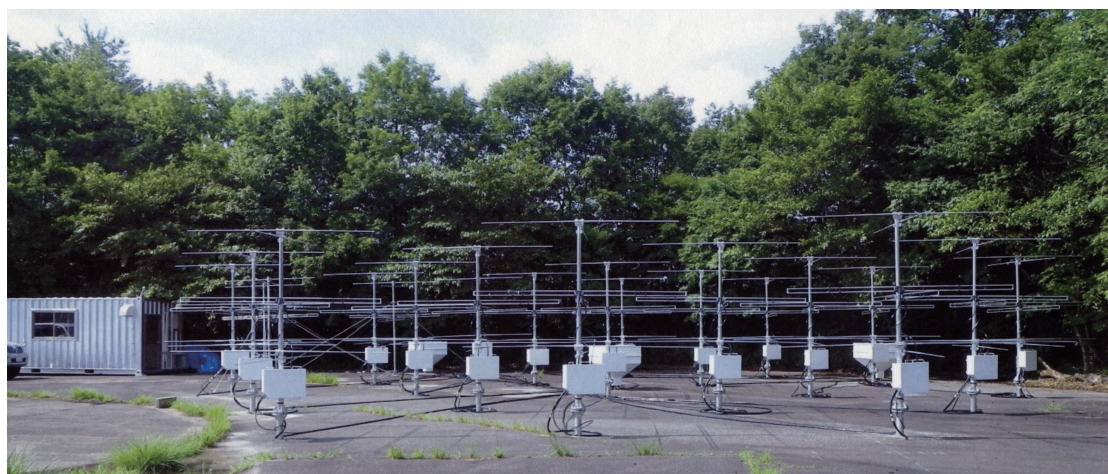


図 2. 信楽 MU 観測所内に設置された PANSY レーダーのトレーニングシステム

システム情報論講座 論理生命学分野（石井研究室）

<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

「大規模計算機による神経細胞の形態変化シミュレーション」

細胞は、外部環境との相互作用の中で移動や形態変化を行い、その生物学的機能を発現している。線維芽細胞の移動は創傷治癒の原理であり、癌細胞の移動・浸潤は癌転移の基本機構である。また、神経細胞の軸索伸長は神経回路網構築のために必須である。したがって、細胞移動や形態形成のメカニズムを理解することは、医学的にも生物学的にも重要である。こうした現象は、細胞外からのシグナルに依存した細胞内シグナル伝達系、アクチンフィラメントや微小管などの細胞骨格系、細胞骨格と細胞膜との相互作用、様々な分子の能動輸送など、多くの細胞内素過程からなる。当研究室では、神経細胞の形態変化に伴う「情報処理」機能の解明を目的として、それら素過程の複合過程をボトムアップからモデル化するとともに、大規模計算機上でシミュレーションするためのソフトウェアを開発している。神戸にて稼働準備中の次世代スーパーコンピュータ「京」での実時間シミュレーションを想定しており、そのためのアルゴリズム・計算手法の開発も同時に行っている。

現在、細胞骨格系の中でも特に重要なアクチンフィラメントのモデル化に注力しており、先行研究による葉状仮足の数理モデルを拡張し、実装している。このシミュレータは、①分子の反応拡散：空間コンパートメント化による各種分子の反応拡散システム、②細胞骨格のダイナミクス：アクチンフィラメント確率反応（重合、脱重合、キャッピング、分枝）、③膜の動力学：エネルギー緩和（アクチンフィラメントによる局所細胞形状変化をエネルギー関数として定式化している）による細胞膜形状変化、からなるマルチフィジックスシステムである（図1）。

実際の細胞におけるアクチンフィラメントの数に対して $1/10^4$ 程度のスケールを持つモデル細胞の形態変化シミュレーションを可能としている。図2に、誘引性物質により右方へと移動する細胞シミュレーションの様子を示す。細胞前方に自身のサイズより狭いスリットがある場合、形態を大きく変えて潜り抜ける浸潤現象が良く再現できているのが分かる。今後、さらに他の細胞骨格制御機構のモデルを導入し、神経細胞における軸索誘導のモデル化を通して、神経回路網形成機序の解明へと進めていく。また、次世代スパコン上での実時間シミュレーションにより、神経回路網が徐々に構築される過程を可視化することで、発達期の神経回路がいかに「情報処理」の基盤を構築するのかを明らかにしていきたい。

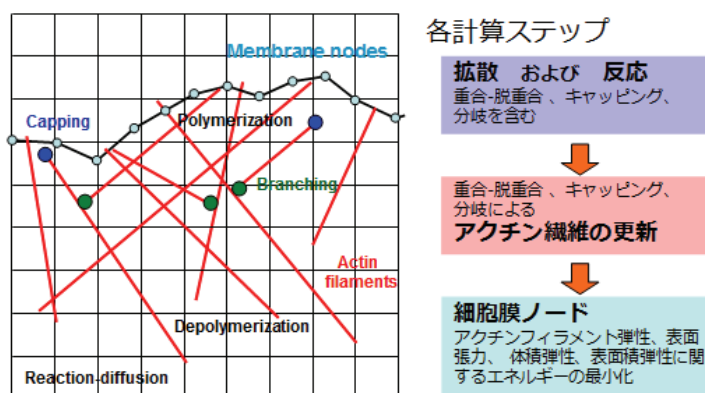


図1. アルゴリズムの概要

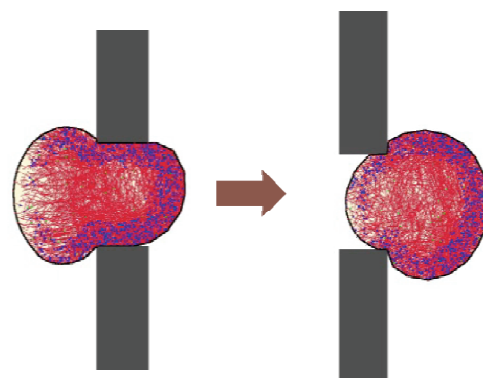


図2. 浸潤性細胞走性のシミュレーション。赤線はアクチンフィラメント、青点はフィラメントの分岐点を表す。

エネルギー材料学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「ビット直列ワード並列方式機能メモリのロジック応用」

ビット直列ワード並列方式強誘電体機能メモリのロジック応用の一環として、検索ソートなど情報処理への応用に着目し、その効果について検討しています。本方式を用いることにより電子計算機の高性能化を目指していますが、機能メモリでの新しいアルゴリズムを用いたソーティングでは大小比較の演算回数は $O(n)$ に減少することが理論的に明らかにされたので、それがどの程度性能向上に貢献するか精度を上げて調べるため、消費電力、遅延などにつき回路シミュレータ（SPICE）を使って計算しています。ここではそれらに関連する研究の概略を述べます。

従来のものと比較するためバブルソートで n 個の数値データを大小の順に並べ替える時の消費電力および処理時間を基準に取ります。 n 個の数値データが n 行 m 列の主メモリに格納されているとして $n=2^m$ の関係があるとします。バブルソートでは隣り合う 2 つのデータを m 桁の CMOS スタチック論理回路で構成する全加算器を使って大小比較をします。ビット列 1 桁での消費電力、遅延時間を各々 P 、 τ とすれば一回の大小比較での消費電力は mP 、一方、遅延時間は並列動作を仮定してほぼ τ としても良いので一回のソーティングに要する消費電力の総量、遅延の総時間はそれぞれ mn^2P 、 $n^2\tau$ となります。これらを基準にして機能メモリを使った場合の性能向上指数を見積もります。

機能メモリに基づいた新アルゴリズムでは全ワードに亘って 1 ビット列のデータを比較するので 2 入力の CMOS 論理回路を全ワード行に一つずつ配置する局所 ALU を使って大小比較が出来ます。その局所 ALU での消費電力と遅延時間をそれぞれ P^* 、 τ^* とすれば機能メモリでの 1 回のソーティングに必要な消費電力と処理時間は最良ケースの場合 nmP^* 、 $n\tau^*$ となります。これから改善の傾向が直ちに理解できます。

ただし、機能メモリの場合並列度が高いのでピーク電力を考慮すると、これは過大評価となります。すなわち、バブルソートではピーク電力は隣接する 2 ワードについて大小比較を並列に行うときに発生するのでその時の消費電力 mP となりますが、機能メモリでは全ワードのデータ比較になるので nP^* と増加します。この点を公正に評価するため機能メモリの局所 ALU に ADL 回路を用いてピーク電力が等しくなるように調整することにします。ADL 回路のランプ波電源の立ち上がり時間を T とすれば機能メモリでの n 行 1 列での消費電力がピーク電力に相当しますので、それは $nP^* \times (\tau^*/T)$ になります。この時間 T は任意に設定できるのでピーク電力が等しくなるようにすると $T = (n/m) \times \tau^*$ が得られます。従って、ADL + 機能メモリでのソーティングに要する消費電力は $nmP^* \times (\tau^*/T) = m^2P^*$ となり、処理時間は $nT = (n^2/m) \times \tau^*$ となります。全加算器の消費電力、遅延を 2 入力の論理回路のそれらと比較すれば大きいと予想されますが、概算ではほぼ等しいとして $P \approx P^*$ 、 $\tau \approx \tau^*$ と置けるので消費電力における改善比はやや小さくなって、 m/n^2 に減少し、一方、処理時間はやはり改善比はやや小さくなりますが $1/m$ に減少することが分かります。電力遅延積で比較すると $1/n^2$ に減少します。

また機能メモリでの局所 ALU 部分選択が不可であれば最悪ケースの場合として見積もることが出来ます。それによると処理時間は変わりませんが、消費電力は $n^2P^* \times (\tau^*/T) = nmP^*$ に増加するという試算が得られます。従って、改善指数は $1/n$ と最良ケースに比べれば劣化する傾向になりますが、やはり消費電力改善の効果は大きいといえます。

最良ケースは機能メモリの局所 ALU 部分選択動作を必要とするので、選択回路や制御信号を別途必要とします。従って、具体化するのにやや困難をとまいます、一方最悪ケースはそういった困難さはないため、具体化するのは容易であるが効率の点でやや不満が残るということで、目下これらの問題点を一気に解決する方策について研究を進めているところです。

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン電流駆動に関する研究

究極のエネルギー源として期待されている磁場閉じ込め核融合炉において、GHz 周波数帯の波を利用した波動加熱はプラズマの生成・加熱に幅広く利用されています。安定した高温プラズマの生成・加熱・電流駆動を行うに当たり、加熱機構の理解と加熱手法の開発は重要な課題として位置付けられています。電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システムはプラズマの生成・加熱・電流駆動を行うことが可能で、世界の多くの核融合実験装置において、局所電子加熱、熱輸送解析、新古典ティアリングモードなどのMHD 不安定性の抑制、オーミックを用いないプラズマ生成等の研究が進められています。その中で、プラズマ中を流れるトロイダル電流の制御は高性能プラズマの実現や定常プラズマ維持に向けての重要な課題の一つです。ヘリカル系では閉じ込め磁場は外部コイルによって形成できることから、オーミック電流のような誘導電流をプラズマ平衡のために必要としません。しかしながら、トカマクと同様に有限のプラズマ圧力がブートストラップ電流を駆動し回転変換分布を変え、プラズマの平衡・安定性が変わることが近年わかってきました。

電子サイクロトロン電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）はブートストラップ電流を抑制し回転変換分布に危険な有理面を生じさせない手法として提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて、電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム（70 GHz、0.4 MW、0.2 sec）を用いて実験的な検証を行っています。2009年には集束ミラーと可動平板ミラーから成る入射システムを導入し、入射角を広い範囲でスキャンできるようにシステムを改良しました（図1参照）。入射ビームの形状を調べるために低パワー（mW）ガンダイオード発振器を用いて測定を行ったところ、図2に示されるような円形ガウスビーム形状が得られ、プラズマ中心にパワーが局在できることを確認しました。この入射ビームを用いたECCD実験を行ったところ、平行屈折率に対する依存性があること、また、磁場配位によって流れやすさが変わることが明らかになりました。ドイツのマックスプランク研究所との国際共同研究によって開発したレイトレーシング電流駆動計算結果と比較したところ、磁場配位依存性を再現するとともに磁場や平行屈折率に対する依存性が定量的に一致することがわかりました。これは、電流駆動が捕捉粒子の影響を強く受けていることを示唆しており、今後、非誘導電流を用いた回転変換分布制御によるプラズマの平衡・閉じ込めに指針を与えることになるものと期待しています。

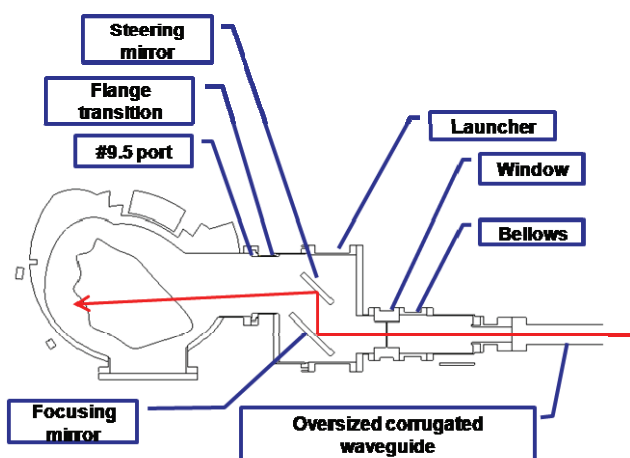


図1 70GHz 電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動入射システム概要図

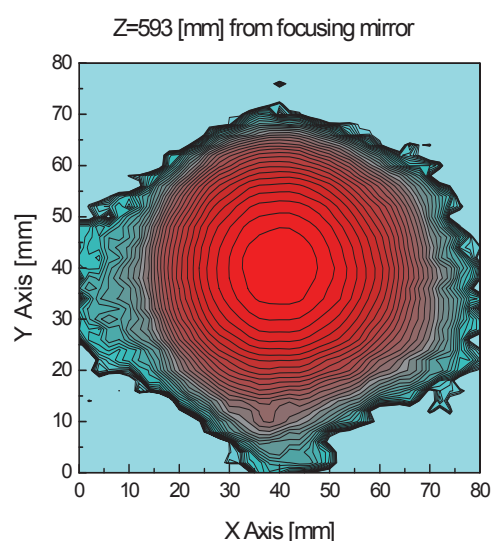


図2 低パワートテストで測定された入射ビーム分布

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/index.html>

核融合プラズマにおける新しい磁場配位の開拓 ～高エネルギーイオンの閉じ込めを調べる～

私たちの研究分野では磁場閉じ込めによる核融合の基礎研究を進めており、京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位は、ヘリオトロンEに代表される歴代のヘリオトロン装置により、高温プラズマ閉じ込め概念としての優位性が実証されてきました。これらの成果を発展させ、更なるプラズマ閉じ込め磁場配位の最適化を目指して、ヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、新たな磁場配位パラメータ領域を開拓し、磁場閉じ込めプラズマの理解に資するため精力的に実験研究を進めています。今回はプラズマ中の高エネルギーイオンの閉じ込めが良くなると現れる異常輸送の現象について述べ、解決のための課題を紹介します。

核融合反応では、反応前後の質量欠損分に相当するエネルギーが、生成した元素の運動エネルギーとなります。例えば重水素・三重水素（DT）の核融合反応では、ヘリウムイオン（ α 粒子）および中性子が生成され、それぞれ3.5MeV、14.1MeVと、高い運動エネルギーを持っています。DT核融合炉においては α 粒子は磁力で閉じ込められるので、背景プラズマとのクーロン衝突でプラズマを加熱することができます。しかし、 α 粒子の閉じ込めが不十分であると背景プラズマの加熱が不足し、外部加熱なしに核融合反応を維持できる自己点火の条件を満たすことができません。

高エネルギーイオンの閉じ込めを良くするためには、第一に磁場の構造を改善することが必要です。ヘリオトロンJではトーラス方向に長周期の磁場強度のリップルを積極的に導入し、その周期の中に局所的に磁場強度の空間的な変動を抑えた領域を設けることで（準等磁場配位）、粒子閉じ込めの改善を目指しています。一方で閉じ込めが良くなると、高エネルギーイオンは電磁流体不安定性を励起し、その不安定性によって自分自身（高エネルギーイオン）の閉じ込めを劣化させる場合もあります（図1、2参照）。この現象はアルヴェン固有モードと呼ばれる電磁流体不安定性の一種と考えられており、高エネルギーイオンを損失させる異常輸送として、自己点火を阻害する要因の一つとみなされています。（アルヴェン固有モードは、電磁流体力学の基礎を築いた功績によりノーベル物理学賞を受賞したハンス・アルヴェンが発見しました。）この現象を明らかにし、次世代の核融合炉に外挿するためには、実験的に「アルヴェン固有モードの空間構造」、「高エネルギーイオン密度の時間・空間変化」、「損失した高エネルギーイオンの速度・空間分布」を「高精度」で計測する必要があります。これらの現象は互いにリンクしているため、特に“同時”に計測し、プラズマ中でどんなことが起こっているのかを理解することが重要です。現在、ヘリオトロンJでは新しい計測手法の適用、計測装置の開発を精力的に進めています。

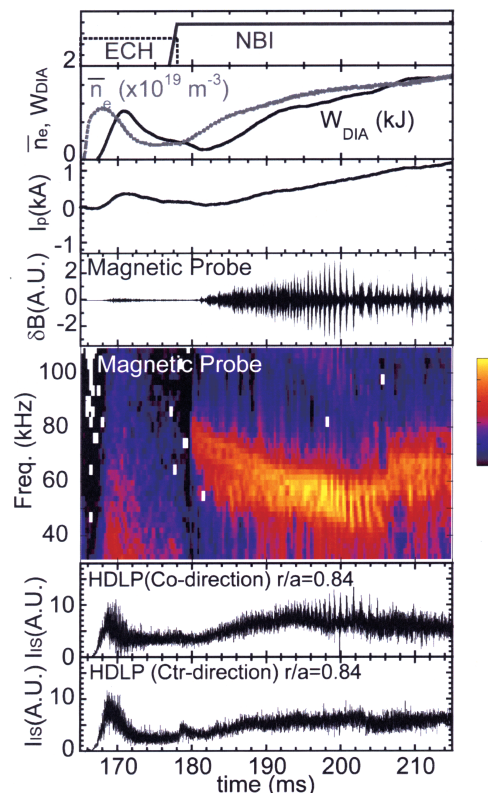


図1 高エネルギーイオンの異常輸送現象の一例。磁場揺動のバースト（ δB ）と同期して、高エネルギーイオン束（ I_s ）の輸送が観測されています。

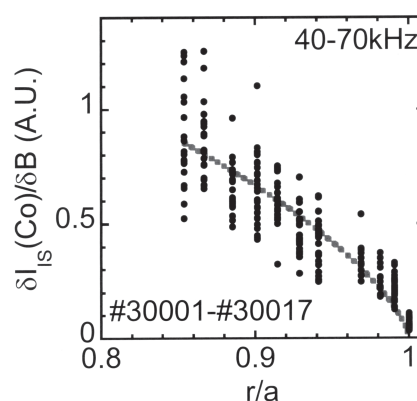


図2 磁場揺動のバースト強度に対する高エネルギーイオン束比（ $\delta I_s / \delta B$ ）の径方向分布。プラズマを閉じ込める領域の外側（ $r/a > 1$ ）ではイオン束がほとんど観測されず、このモードは局所的なイオン束の変位しか引き起こしていないことを示しています。

診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab/>

「衛星ビーコン観測による電離圏大規模波動構造と赤道スプレッド F 現象の観測」

電離圏には様々な時間・空間スケールを持つ波動・擾乱現象が存在する。赤道スプレッド F 現象 (Equatorial Spread-F、ESF と略記、プラズマバブルとも呼ばれる) は電離圏の最も強い擾乱の一つであり、太陽活動度の活発期に増大する。ESF は、磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、電離圏擾乱の内でも最も活発な現象として赤道低緯度電離圏研究のホットトピックであり続けてきた。しかしながら ESF を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。

ESF は電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。GPS 測位は、民間航空管制への応用が始まるなど社会インフラとして重要性が高まっているが、電離圏擾乱によって測位精度が低下したり測位ができなくなったりする、という悪影響が懸念されている。また高度 400 km 以上の電離圏は、国際宇宙ステーションを含む諸衛星が飛翔する領域である。電離圏は、衛星の周辺環境さらには新たな人類生存環境としても重要性が高まっている。

京都大学生存圏研究所（以下では RISH）では、インドネシア・スマトラ島の赤道直下に位置する赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) を用いて ESF を研究してきたが、最近では名古屋大学太陽地球環境研究所 (STEL) および情報通信研究機構 (NICT) との協力のもとに、イオノゾンデ・衛星ビーコン受信機・大気光観測装置等による広域観測網の構築が進んでいる。

図 1 にインドから太平洋にかけての観測点の分布（予定を含む）を示す。NICT は SEALION と呼ばれるイオノゾンデ観測網をタイ・ベトナム・インドネシアに構築しており、STEL はチェンマイ（タイ）とコトタバン（EAR サイト）にファブリペロー干渉計を設置して熱圏風の観測を始めた。我々は、GNU Radio と呼ばれるフリーのデジタル受信機用ハードウェア・ソフトウェアを駆使して開発した衛星ビーコン観測用の受信機を各地に展開中である。さらに、米国 SRI International では太平洋上の島々に VHF レーダー・イオノゾンデ・数台の衛星ビーコン受信機からなる観測網を構築中であり、インドには多数の観測点が存在している。これらをうまく糾合することで、経度範囲約 100 度 × 緯度範囲約 20 度（磁気赤道の周辺 ± 10 度）に広がる地上観測網の構築を目指している。

ESF が日々変動を引き起こす要因については、(1) 赤道低緯度電離圏の南北半球対称性、(2) Large-scale wave structure (LSWS; 電離圏 F 領域下部に現れる、電子密度分布が東西波長数百 km で上下に波打つという波状構造)、(3) 大気下層から伝搬してくる中性大気波動、が議論されているが、圧倒的なコンセンサスを得たものはまだない。広域観測網から得られる多様なデータを活用して、これらの解明を目指していく。

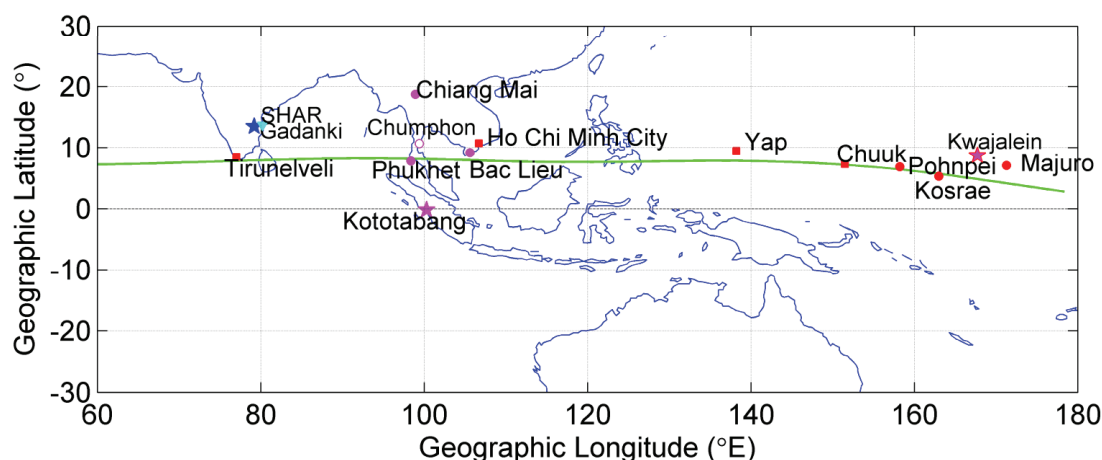


図 1 インドから太平洋にかけての ESF 研究用の地上観測網（予定を含む）。タイ・ベトナム・インドネシアを中心として RISH・STEL・NICT によるネットワークが構築されている。太平洋上の観測点は米国 SRI International による。インドの研究グループによる観測研究も盛んに行われている。

生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野（山川研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space>

「帯電現象の積極的な利用による人工衛星の軌道・姿勢制御に関する研究」

宇宙空間を飛翔する人工衛星では、通常宇宙空間に存在するプラズマにより太陽電池パネルなどの誘電体が局所的に帯電し、最悪の場合絶縁破壊を起こした事例も存在する。このような問題に対し、衛星からイオンや電子を放出することによって帯電を緩和し、人工衛星が破壊されるリスクを小さくする研究が為されている。我々は、これに対し衛星帯電を積極的に活用し、帯電量を能動的にコントロールすることによって人工衛星の軌道や姿勢の制御手法の研究を行っている。軌道制御を考察する場合は、人工衛星を帯電した点電荷としてとらえ、姿勢制御を検討する場合は、人工衛星の本体の両端に伸びるロッドの先端を帯電させることを想定する。帯電による力としては、1つの人工衛星だけを帯電させる場合には、地球磁場中の運動に起因するローレンツ力を考慮する。また、2つ以上の人工衛星を帯電させる場合には、クーロン力を主に考慮することになる。それ以外に支配的な力としては重力を考慮するが、大気抵抗、太陽光圧、地球形状の扁平に起因する高次の重力項については、短い飛行時間では相対的に小さいとして無視してかまわない。

クーロン力によるフォーメーションフライト：2つ以上の帯電した衛星間の距離が、地球周辺のプラズマ環境におけるデバイ長よりも小さい場合、プラズマによるデバイ遮蔽の効果が及ばないため、これらの衛星はお互いにクーロン力を及ぼすことができる。デバイ長が十分に大きな領域（例えば静止軌道上）ではクーロン力によるフォーメーションフライトが可能であり、例えば、2つの衛星が互いに距離を一定に保ちながら高度 36,000km の静止軌道を周回する軌道が存在することがわかっている。本研究室では、帯電量の制御を行うことで、地球赤道面内の円軌道上において、地球中心の半径方向に2衛星を安定な位置に配列させる制御手法についての研究を行った [1]。また、クーロン力と重力のある関係条件を満たすことで、地球と2つの帯電衛星の相互作用により、天体力学の分野で扱われる制限3体問題の手法が適用できることを見出した [2]。

ローレンツ力によるフォーメーションフライト：クーロン力によるフォーメーションフライトは、デバイ長が十分大きくなければデバイ遮蔽によりクーロン力が働かないため有効でない。例えば高度数百 km の低高度軌道ではデバイ長は衛星サイズよりも小さくなり、クーロン力によるフォーメーションフライトは不可能である。一方で、高度数百 km の地球近傍であれば地球磁場によりローレンツ力が働くため、これにより帯電した衛星の軌道制御が可能となる。地球を周回する非帯電衛星（ターゲット）を基準とし、ターゲット衛星から僅かに離れた距離にあり地球を周回する帯電衛星（チェイサー）の相対的な軌道の解析を行っている。現在は、どのように帯電量を変化させれば、地球赤道面に平行な円軌道上において、基準点（ターゲット）の周辺領域において、任意の位置から別の任意の位置へ移動出来るか、あるいは任意の軌道から別の軌道へ遷移できるかについて検討を進めており、基準点近傍領域で線形化した場合における制御手法の確立の可能性を見出している [3, 4]。また、ロッドの両端を異符号で帯電させて、それぞれの点電荷にかかるローレンツ力によって衛星重心まわりに生じるトルクを考慮して、赤道面内の円軌道上において、基準姿勢に対する姿勢角度、および、姿勢角速度のダイナミクスを位相平面上で解析した。同時に、電荷量制御、すなわち、トルク制御を行うことで、目標姿勢に誘導できることを示した [5]。

参考文献

- [1] Yamamoto, U., Yamakawa, H., "Two-craft Coulomb-force Formation Dynamics and Stability Analysis with Debye Length Characteristics," Paper AIAA-2008-7361, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, 18 - 21 Aug, Honolulu, Hawaii, 2008.
- [2] Yamakawa, H. and Bando, M., "Gravity-Coulomb Force Combined Three-Body Problem," The 18th Symposium of International Federation of Automatic Control in Automatic Control in Aerospace (IFAC ACA 2010), Nara, Japan, September 6-10, 2010.
- [3] Bando, M. and Yamakawa, H., "Spacecraft Relative Dynamics under the Influence of Lorentz Force," AIAA/AAS Astrodynamics Conference, Toronto, August 2-5, 2010.
- [4] 辻井秀, 矢野克之, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力を用いた衛星編隊飛行のダイナミクスと制御に関する研究", Paper 1105, 2010 年 11 月 17-19 日, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 静岡.
- [5] Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-Shaped Charged Satellite," Paper IAC-10.C1.3.10, 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, September 26-October 1, 2010.